

7공 프로브의 원추각이 유동 측정 정확도에 미치는 영향에 대한 연구

이용진* · 박정신** · 노영철** · 전창수*** · 곽재수****†

Effect of Cone Angle of a Seven-Hole Probe on the Accuracy Flow Measurement

Yong Jin Lee*, Jung Shin Park**, Young Cheol Nho**, Chang Soo Jeon***, Jae Su Kwak****†

Key Words : Seven-hole probe(7공 프로브), Cone angle(원추각), Interpolation(보간법), Flow measurement(유동측정)

ABSTRACT

In this study, the effect of cone angle of seven-hole probe on the accuracy of measured flow angle and velocity has been investigated. The seven-hole probe consisted of seven 1mm OD stainless inner tubes and one 3mm ID stainless tube. Six cone angles of 45°, 60°, 75°, 90°, 105° and 120° were tested. Calibrations of the seven-hole probes were conducted within $\pm 6^\circ$ range with the interval of 5°. Analysis results show that the effect on the cone angle was not significant on the accuracy of the measured flow angle, pressure, and velocity. However, the data reduction method had more effect on the measurement accuracy.

1. 서 론

멀티홀 프로브(multihole probe)는 각각의 압력공으로부터 측정된 압력을 이용하여 3차원 유동장의 유동속도와 유동각, 전압, 정압 등을 동시에 측정할 수 있어 다양한 유동장 측정에 활용되고 있다. 기존에 폭넓게 사용되었던 5공 프로브가 일반적으로 $\pm 30^\circ$ 의 유동각 측정범위를 갖는데 비해 7공 프로브는 보정 및 데이터 처리 작업이 복잡한 단점에도 불구하고 최대 $\pm 80^\circ$ 까지 유동각 측정이 가능하고, 5공 프로브에 비하여 7개의 관이 정렬이 쉬워 제작이 용이하다는 장점을 보유하고 있어 터빈 내부 유동과 같이 복잡한 3차원 유동장 측정에 점차 확대 적용되고 있다.

Gerner 등⁽¹⁾은 아음속 압축성 유동에서의 7공 프로브의 non-nulling 기법으로 측정된 데이터를 3차 다항식으로 곡선맞춤을 이용하여 해석하였다. Zilliac⁽²⁾은 non-nulling 기법을 이용한 7공 프로브의 보정(calibration)작업을 한 후

Akima⁽³⁾의 보간법을 이용하여 유동장을 측정하였다. Takahashi⁽⁴⁾는 Zilliac⁽²⁾의 방법에 준정상상태(Quasi-steady state)이론을 적용하여 비정상 유동에서도 사용 가능한 알고리즘을 제시하였다. Sumner⁽⁵⁾는 비압축성 유동에서 Gerner⁽¹⁾의 곡선맞춤 방법과 Zilliac⁽²⁾의 보간법을 사용한 결과를 비교하여 낮은 각도에서는 두 방법의 결과의 차이가 없지만 프로브의 팁에서 유동박리가 일어나는 높은 각에서는 Zilliac⁽²⁾의 방법이 좋음을 보였다. Zeiger 등⁽⁶⁾은 원뿔형, 반구형, 면형 등의 7공 프로브 팁 형상이 보정결과와 유동측정에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하여 동일한 조건에서 팁의 형상에 따른 영향이 크지 않음을 보였다. 노영철 등⁽⁷⁾은 기존의 5공 프로브와 원추각이 90°인 7공 프로브를 이용하여 터빈 캐스케이드의 이차유동 측정을 통하여 기존의 5공 프로브 보다 7공 프로브가 더 높은 유동각의 범위를 측정할 수 있음을 보였다.

이와 같이 7공 프로브의 보정 및 해석 방법, 형상 설계를 통해 유동측정의 정확성을 높이기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 7공 프로브는 5공 프로브에 비해 넓은 범위의 유동각을 측정할 수 있다는 장점이 있으나, 이 역시 높은 유동각에서 유동박리 현상에 의한 유동 측정 오류가 발생한다. 윤태진 등⁽⁸⁾은 5공 프로브의 원추각과 압력공방향이 보정작

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원 (국방기술품질원)

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

*** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail : jskwak@kau.ac.kr

업에 미치는 영향에 대하여 연구를 하여 원추각이 큰 경우에는 압력공의 방향이 영향을 주지 않지만 원추각이 작은 경우에는 압력공의 방향에 따라 보정의 차이가 있음을 보였다. 본 연구에서는 7공 프로브의 원추각(cone angle, α_c)이 보정 및 유동 측정 결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 각각 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°의 원추각을 갖는 7공 프로브를 제작하여 Zilliac⁽¹⁾의 방법으로 보정하고 유동을 측정하여 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 7공 프로브의 측과 각도 그리고 원추각의 정의를 나타낸 것이다. 본 연구에서 7공 프로브의 원추각(α_c)은 각각 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°로 제작하고 동일한 조건에서 보정 작업을 수행하였으며 홀의 번호는 Fig. 2와 같이 정의되었으며 사용된 내부 튜브의 외경은 1mm, 내경은 0.9mm 이고 외경과 내경이 각각 4mm와 3mm인 관의 내부에 정렬하였다.

본 연구에서 진행한 7공 프로브의 보정은 Zilliac⁽²⁾의 방법을 토대로 하였으며, 요각 및 피치각의 범위는 $\pm 60^\circ$ 로 하였다. 보정절차는 다음과 같다.

1) 프로브를 $\pm 60^\circ$ 범위에서 요각과 피치각을 5°간격으로 회전 시키면서 프로브 각 홀의 압력 값과 P_{total} , P_{static} 을 측정한다.

2) 각 위치에서 아래의 28(7×4)개의 보정압력상수를 계산한다.

$$C_{P_{r1}} = \frac{P_1 - P_7}{P_1 - \frac{P_2 + P_6}{2}}, C_{P_{r11}} = \frac{P_6 - P_2}{P_1 - \frac{P_2 + P_6}{2}} \quad (1)$$

$$C_{P_{r2}} = \frac{P_2 - P_7}{P_2 - \frac{P_1 + P_3}{2}}, C_{P_{r12}} = \frac{P_1 - P_3}{P_2 - \frac{P_1 + P_3}{2}} \quad (2)$$

$$C_{P_{r3}} = \frac{P_3 - P_7}{P_3 - \frac{P_2 + P_4}{2}}, C_{P_{r13}} = \frac{P_2 - P_4}{P_3 - \frac{P_2 + P_4}{2}} \quad (3)$$

$$C_{P_{r4}} = \frac{P_4 - P_7}{P_4 - \frac{P_3 + P_5}{2}}, C_{P_{r14}} = \frac{P_3 - P_5}{P_4 - \frac{P_3 + P_5}{2}} \quad (4)$$

$$C_{P_{r5}} = \frac{P_5 - P_7}{P_5 - \frac{P_4 + P_6}{2}}, C_{P_{r15}} = \frac{P_4 - P_6}{P_5 - \frac{P_4 + P_6}{2}} \quad (5)$$

$$C_{P_{r6}} = \frac{P_6 - P_7}{P_6 - \frac{P_5 + P_1}{2}}, C_{P_{r16}} = \frac{P_5 - P_1}{P_6 - \frac{P_5 + P_1}{2}} \quad (6)$$

$$C_{P_{total}} = \frac{P_1 - P_{total}}{P_1 - \frac{P_2 + P_6}{2}}, C_{P_{static}} = \frac{\frac{P_2 + P_6}{2} - P_{static}}{P_1 - \frac{P_2 + P_6}{2}} \quad (7)$$

$$C_{P_{static}} = \frac{P_2 - P_{total}}{P_2 - \frac{P_1 + P_3}{2}}, C_{P_{static2}} = \frac{\frac{P_1 + P_3}{2} - P_{static}}{P_2 - \frac{P_1 + P_3}{2}} \quad (8)$$

$$C_{P_{static3}} = \frac{P_3 - P_{total}}{P_3 - \frac{P_2 + P_4}{2}}, C_{P_{static3}} = \frac{\frac{P_2 + P_4}{2} - P_{static}}{P_3 - \frac{P_2 + P_4}{2}} \quad (9)$$

$$C_{P_{static4}} = \frac{P_4 - P_{total}}{P_4 - \frac{P_3 + P_5}{2}}, C_{P_{static4}} = \frac{\frac{P_3 + P_5}{2} - P_{static}}{P_4 - \frac{P_3 + P_5}{2}} \quad (10)$$

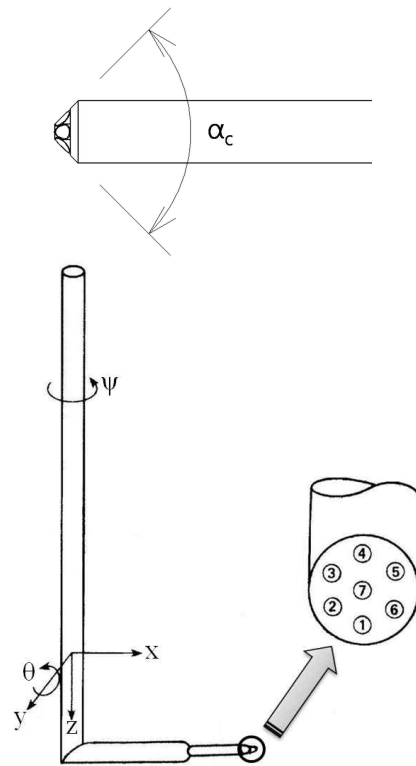


Fig. 1 7-hole probe

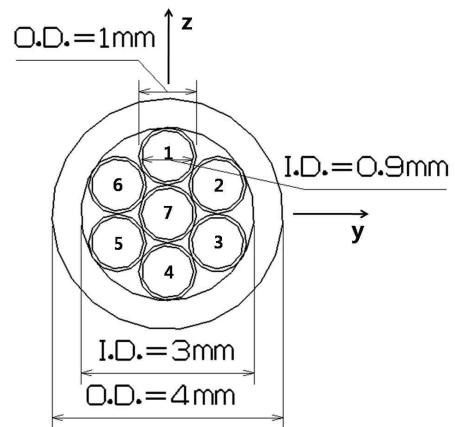


Fig. 2 Front view of 7-hole probe

$$C_{P_{obs5}} = \frac{P_5 - P_{total}}{P_5 - \frac{P_4 + P_6}{2}}, \quad C_{P_{obs5}} = \frac{\frac{P_4 + P_6}{2} - P_{static}}{P_5 - \frac{P_4 + P_6}{2}} \quad (11)$$

$$C_{P_{obs6}} = \frac{P_6 - P_{total}}{P_6 - \frac{P_5 + P_1}{2}}, \quad C_{P_{obs6}} = \frac{\frac{P_5 + P_1}{2} - P_{static}}{P_6 - \frac{P_5 + P_1}{2}} \quad (12)$$

$$C_{P_{obs7}} = \frac{P_4 - P_1}{P_7 - \bar{P}} + \frac{\frac{P_3 - P_6}{P_7 - \bar{P}} - \frac{P_2 - P_5}{P_7 - \bar{P}}}{2},$$

$$C_{P_{st}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{P_3 - P_6}{P_3 - \bar{P}} + \frac{P_2 - P_5}{P_7 - \bar{P}} \right) \quad (13)$$

$$C_{P_{obs7}} = \frac{P_7 - P_{total}}{P_7 - \bar{P}}, \quad C_{P_{obs7}} = \frac{\bar{P} - P_{static}}{P_7 - \bar{P}} \quad (14)$$

여기서, $\bar{P} = \frac{1}{6}(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6)$ 이다.

3) 위의 28개의 계수를 이용해 각 영역별 보정 그래프를 작성한다.

4) 측정하고자 하는 유동장을 7공 프로브로 측정된 뒤 각 측정점마다 가장 큰 압력 값을 나타내는 영역(sector)을 선정한다. 7개의 영역은 높은 흐름각 영역(sector 1~6)과 낮은 흐름각 영역(sector 7)으로 구별한다. 높은 흐름각 영역에서는 식 (1)~(12)까지 사용하였고 낮은 흐름각 영역은 식 (13)~(14)까지 사용하였다.

5) 정해진 영역의 압력계수들을 구한다.

6) Fig.3 과 같이 절차 3)에서 구한 보정 그래프와 Akima 보간법을 이용하여 θ' , ψ' 값을 구한다.

7) 절차 6)에서 구한 θ' , ψ' 값을 이용하여 Fig.4에서와 같이 spline을 통하여 $C_{P_{obs}}$, $C_{P_{st}}$ 값을 구한다.

8) 절차 7)에서 구한 $C_{P_{obs}}$, $C_{P_{st}}$ 값을 절차 2)의 $C_{P_{obs}}$, $C_{P_{st}}$ 식에 대입해 P_{total}' , P_{static}' 값을 구한다.

9) 속도의 크기(|V|)와 성분은 다음과 같다.

$$|V| = \sqrt{\frac{2(P_{total}' - P_{static}')}{\rho_0}} \quad (15)$$

$$u = |V| \cos\theta \cos\psi \quad (16)$$

$$v = |V| \sin\theta \quad (17)$$

$$w = -|V| \cos\theta \sin\psi \quad (18)$$

보정은 Fig. 5와 같이 스테핑모터를 사용해 제작한 자동 이송장치를 이용하여 $-60^\circ \sim +60^\circ$ 범위의 피치각(θ)과 요각(ψ)에 대하여 각각 5° 간격으로 수행하였다. 이때 유동 속도는 30m/s, 7공 프로브 직경(D)을 기준으로 한 레이놀즈수 (Re_D)는 8.25×10^4 이다.

보정과정을 통해 7개의 압력공으로부터 측정된 압력값과

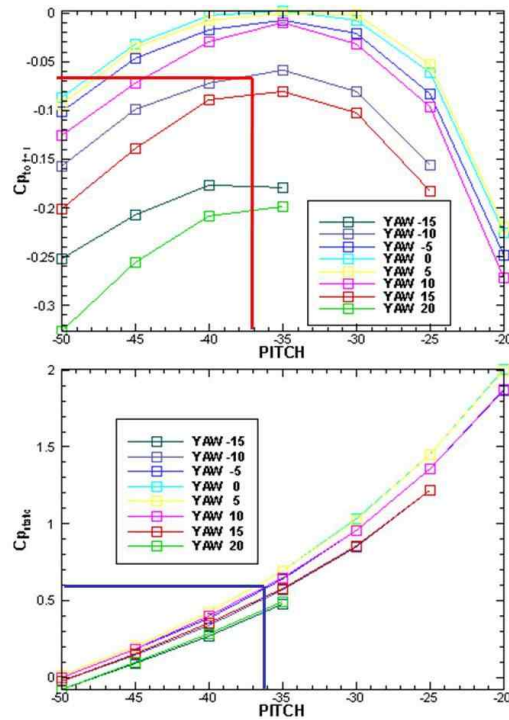


Fig. 4 Relation between $C_{p_{total}}$, $C_{p_{static}}$, and flow angles

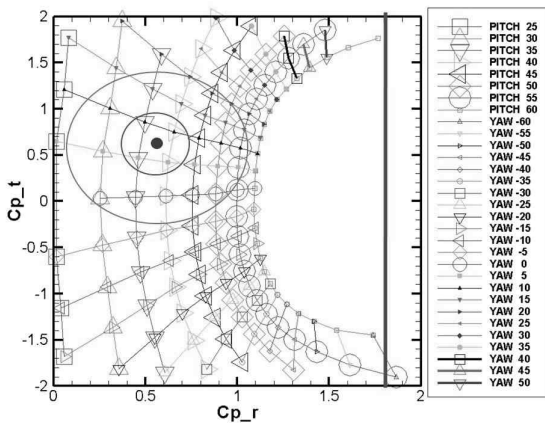


Fig. 3 Relation between C_{p_t} , C_{p_r} and flow angles

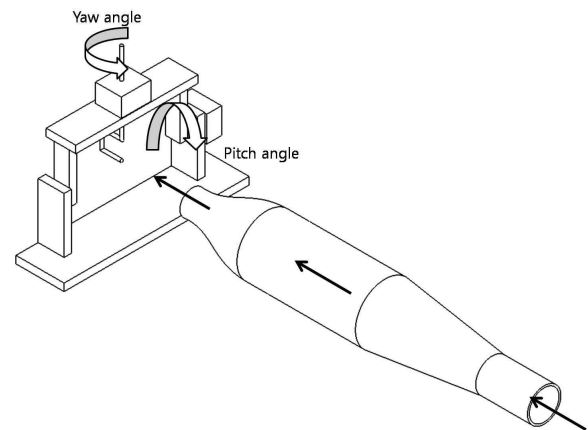


Fig. 5 Calibration device

P_{total} , P_{static} 으로부터 각각 28개의 보정압력계수를 계산하고, 이를 이용하여 보정곡선을 작성하였다.

보정 작업이 완료된 각 프로브에 대하여 보정과정에서와 동일한 조건 및 방법으로 유동을 측정하여 비교함으로써 프로브의 원추각 변화에 따른 측정결과의 변화를 고찰하였다. 이때, 프로브는 피치각 및 요각에 대하여 각각 10° 간격으로 회전시키며 측정을 수행하였다.

측정값으로부터의 유동각 계산은 Akima⁽³⁾의 보간법을 적용하였다. 측정을 통해 얻어진 압력값들을 이용하여 압력계수를 구하고 그것을 보정곡선에 적용하여 유동각을 계산하였다.

Akima 보간법이란 Fig. 3에서와 같이 2차원에 분포되어 있는 데이터에서 주변의 알고 있는 임의의 데이터들을 이용하여 한 지점의 값을 구할 수 있는 보간법이다. 이 방법의 경우, 측정된 데이터를 기준으로 보간법에 사용될 기준 데이터의 범위, 데이터의 개수 등이 보간된 데이터의 정확도에 큰 영향을 미치게 된다. Akima 보간법을 적용할 때, 압력계수가 1.8 이상인 부분의 데이터는 보간법에서 제외하였다.

3. 결과 및 분석

45° , 60° , 75° , 90° , 105° , 120° 의 원추각을 갖는 프로브를 이용하여 유동을 측정한 결과를 바탕으로 각 프로브의 섹터

분포와 유동 측정 정확도를 분석하였다. 먼저 Fig. 6의 원추각 변화에 따른 섹터분포를 살펴보면 원추각이 커짐에 따라 7번 섹터의 크기가 작아지고 또한 유동각이 큰 부분에서는 섹터분포에 오차가 발생함을 볼 수 있다. 이는 원추각이 작아질수록 7번 홀과 주변 홀과의 압력차가 커지기 때문이다.

Zilliac⁽²⁾의 연구에서는 7번 섹터의 범위가 원추각의 1/2 정도 범위에 위치한다고 하였는데 본 연구에서의 섹터 분포를 살펴보면 원추각이 45° 와 60° 의 경우는 약 $-25^\circ \sim +25^\circ$ 범위에 위치하였지만 나머지의 원추각에서는 1/2 정도의 범위보다 작은 분포를 보였다. 또 Zilliac⁽²⁾은 Akima 보간법을 이용할 경우에 유동이 프로브 팁에서 박리되지 않는 7번 섹터 영역의 측정 정확도가 가장 크다고 하였다. 따라서, 원추각이 큰 경우보다 원추각이 상대적으로 작은 경우가 7번 섹터의 영역이 넓기 때문에 유동 측정에 있어서 정확성이 높을 것으로 판단된다.

섹터 분포로만으로는 어떤 원추각에서의 정확도가 높은지를 판단할 수 없다. 원추각에 따른 측정 정확도를 정량적으로 비교하기 위하여 피치각을 -60° , -30° , 0° , 30° , 60° 로 고정하고 요각을 10° 간격으로 변화시키면서 측정된 요각과 실제 요각의 오차를 분석해보았다. Fig. 7에서는 원추각이 다른 6개의 7공 프로브 모두 매우 작은 요각의 오차를 보이는 것을 볼 수 있다. 유동각이 큰 영역에서는 약간의 오차가 발생하지만 이는 보정 최대 각도 영역이므로 보간법 과정에

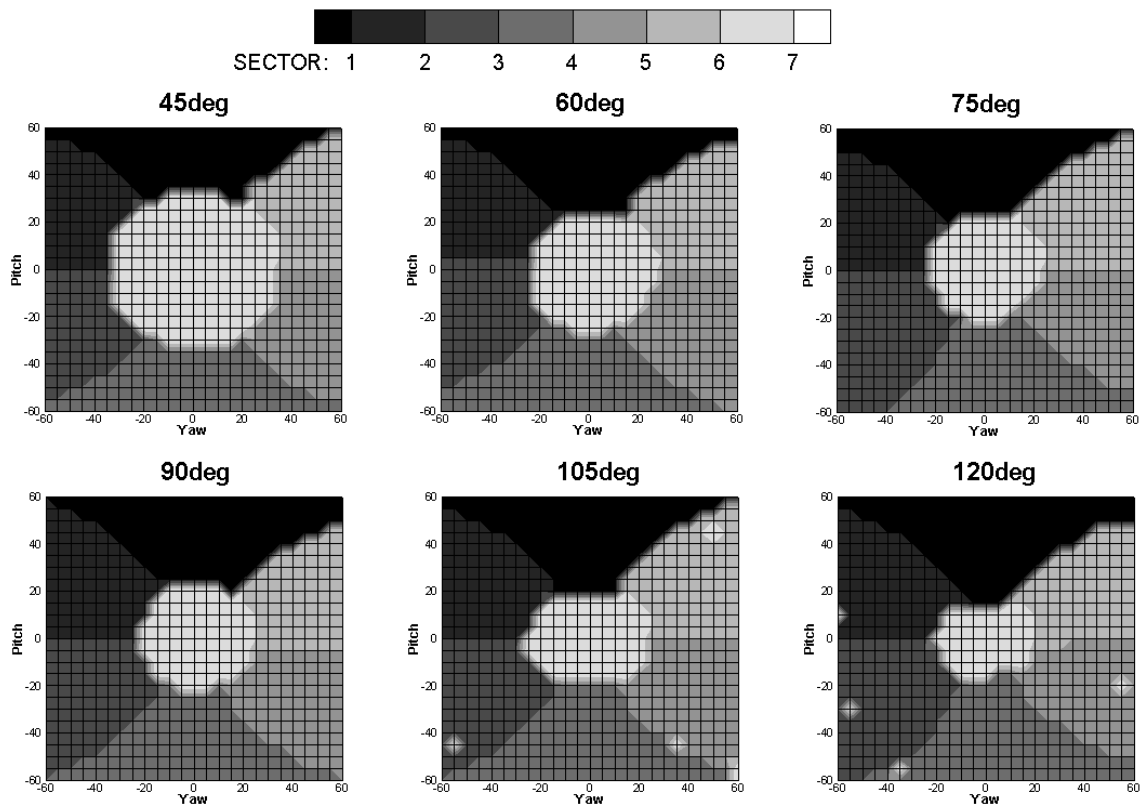


Fig. 6 Sector distribution with varying cone angle of 7-hole probe

서의 오차로 보인다.

Akima 보간법을 이용하여 유동각을 계산하는 과정에서 7 번 섹터의 선정 기준이 되는 압력계수 값과 7번섹터의 최대 범위, 보정에 사용될 데이터의 개수 등의 계수를 지정해주었다. 원추각이 큰 경우에는 7번 홀과 주변 홀의 압력 값의 차이가 크지 않아 계수 조정에 따라 정확도의 차이를 보였다. 또한 측정된 유동의 압력계수를 이용하여 유동각을 구하는 과정에서는 보간법에 사용되는 데이터의 개수와 범위를 조정하여 주는 것이 측정 유동각 정확도의 차이를 가져왔다. 원추각이 큰 경우에는 7번 섹터가 상대적으로 좁고 측정 정확도를 높이기 위한 Akima 보간법의 계수 조정이 어려웠지

만 모든 원추각에 대해서 높은 유동각에서도 정확한 측정이 가능함을 볼 수 있다.

Fig. 8은 실험결과 측정된 전압 값의 결과이다. 유동각이 60°에 가까운 영역에서는 유동이 보정범위를 넘어서 전압 값이 계산되지 못하는 부분이 나타났다. 하지만 원추각이 다른 6개의 7공 프로브 모두 전반적인 영역에서는 전압 값이 일정한 것을 볼 수 있었다.

Fig. 9를 보면 속도 역시 전압과 마찬가지로 유동각이 큰 영역에서는 오차를 보였다. 또한 전압에서와 달리 유동각이 30°인 부근에서도 큰 오차를 보이는 경우가 있었다. 이는 보정과 측정 과정에서 나타나는 실험 오차 등에 의해 두 섹터

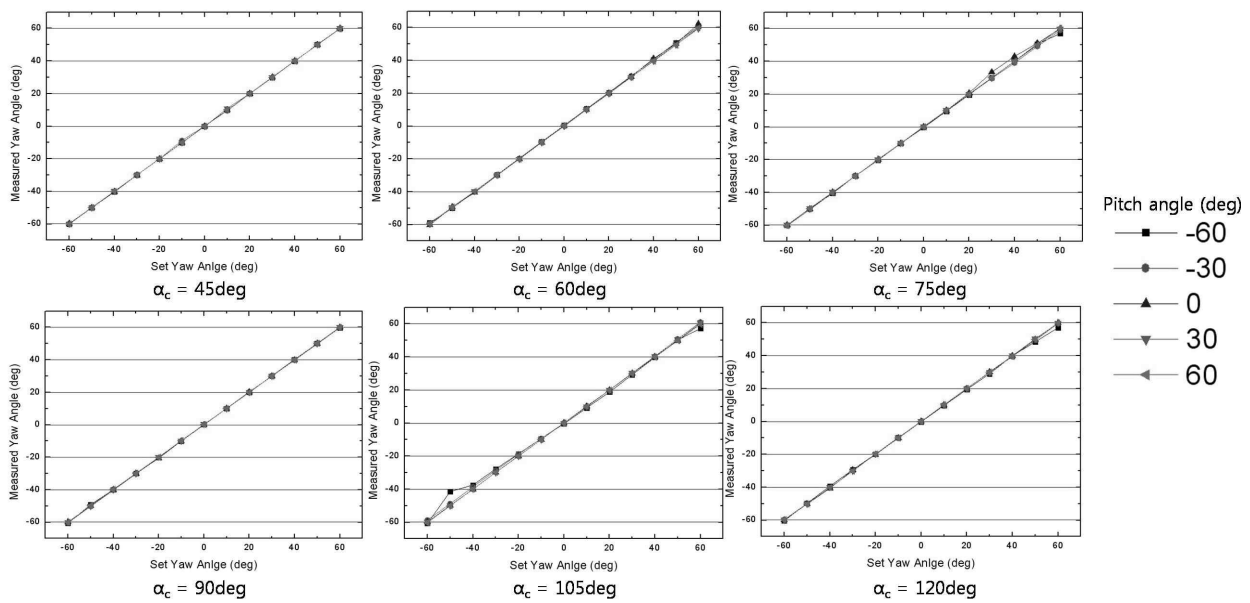


Fig. 7 Measurement error with varying set yaw angle in constant pitch angle

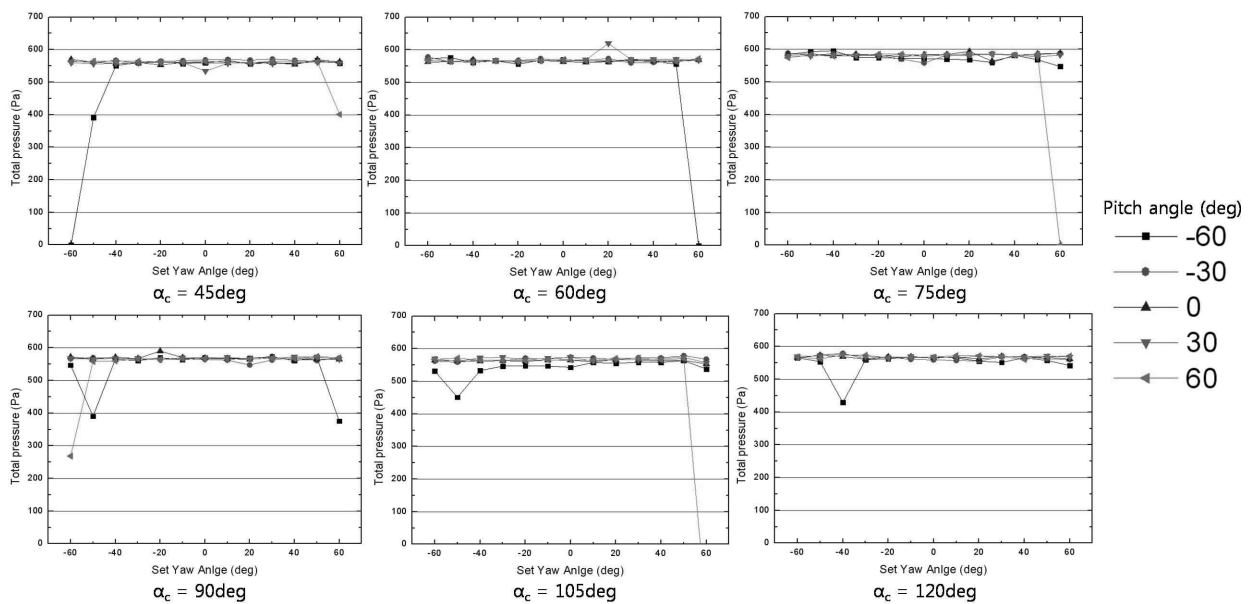


Fig. 8 Total pressure with varying set yaw angle in constant pitch angle

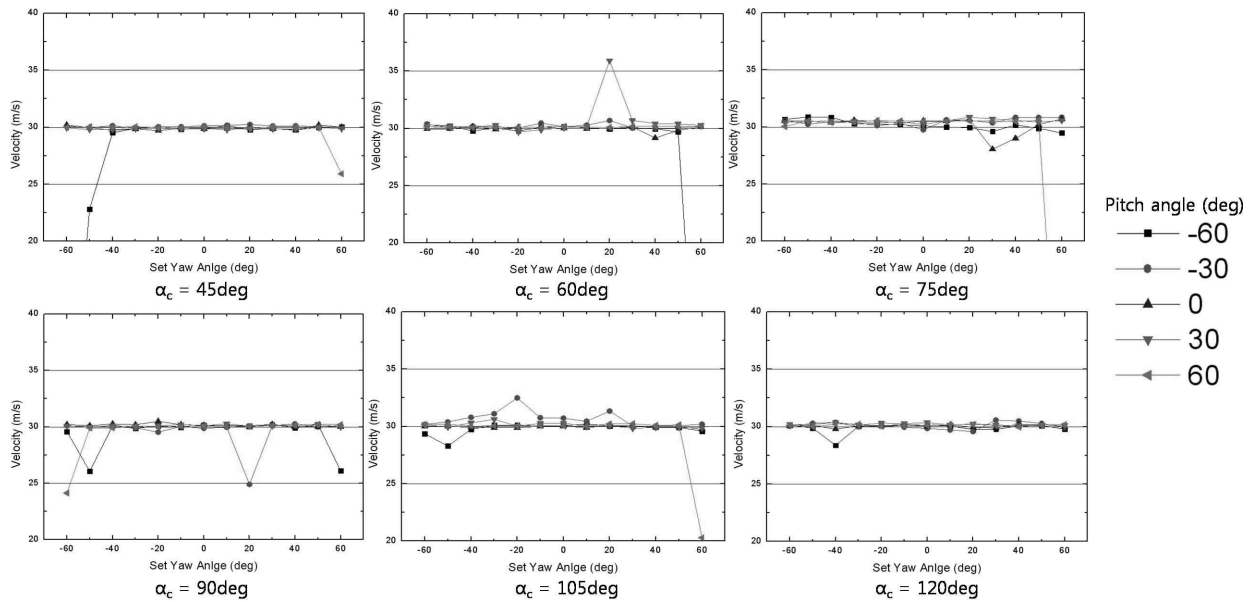


Fig. 9 Velocity with varying set yaw angle in constant pitch angle

의 경계 부근에서 나타나는 섹터 선정의 모호성에 의해 기인한 것으로 판단된다.

유동각은 전체 보정범위에 대해 매우 작은 측정 오차를 보였지만 전압과 속도는 유동각이 큰 영역과 두 섹터의 경계부근에서 비교적 큰 오차를 보였다. 원추각이 다른 6개의 7공 프로브를 비교한 결과, 오차가 큰 섹터의 경계부근을 제외하고는 측정 범위 내에서는 모두 작은 오차를 보였고, 실험에 사용된 범위 내에서는 원추각에 의한 측정 정확도의 영향을 미미한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 7공 프로브의 원추각 크기가 유동 측정결과에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 7공 프로브를 이용하여 $\pm 60^\circ$ 의 범위의 피치각과 요각에 대하여 5° 간격으로 보정작업을 수행하였고 원추각에 따른 측정 정확도를 정량적으로 비교하기 위하여 피치각을 고정시키고 요각을 10° 간격으로 변화시키면서 측정된 유동각과 전압, 속도 등의 오차에 대한 분석을 수행하였다.

유동각 측정의 정확도를 분석한 결과 Akima 보간법의 계수 조정을 통하여 유동각이 높은 부분에서도 높은 정확성을 볼 수 있었지만 유동 속도의 경우에는 섹터의 경계 부근에서 오차가 생기는 것을 확인할 수 있었다.

또한 7공 프로브를 이용한 유동측정에 있어서는 프로브 원추각의 영향보다는 수치해석 방법이 정확도에 차이를 가져옴을 알 수 있었고, 추후 섹터경계 부근에서 발생하는 측정 오차를 줄이기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0058609).

참고문헌

- (1) Gerner, A. A., Maurer, C. L. and Gallington, R. W., 1984, "Non-nulling Seven-hole Probes for High Angle Flow Measurement," Experiments in Fluids, Vol. 2, No. 2, pp. 95~103.
- (2) Zilliac, G. G., 1993, "Modeling, Calibration, and Error Analysis of Seven-hole Pressure Probes," Experiments in Fluids, Vol. 14, No. 1-2, pp. 104~120.
- (3) Akima H., "A Method of Bivariate Interpolation and Smooth Surface Fitting for Irregularly Distributed Data Points," ACM Transactions on Mathematical Software, Vol 4, No. 2, June 1978, pp. 148~159.
- (4) Takahashi, T. T., 1997, "Measurement of Air Flow Characteristics Using Seven Hole Cone Probes," AIAA paper 97-0600.
- (5) Sumner, D., 2002, "A Comparison of Data-reduction Methods for a Seven-hole Probe," Journal of Fluids Engineering, Vol. 124, No. 2, pp. 523~527.
- (6) Zeiger, M. D., Chalmeta, L. P. and Telionis, D. P., 1998, "Tip Geometry Effects on Calibration and Performance of Seven-hole Probes," AIAA paper 98-2810.
- (7) 노영철, 이용진, 박정신, 서보경, 김학봉, 곽재수, 2009, "5공과 7공 프로브를 이용한 터빈 캐스케이드의 이차유동 측정 결과 비교연구," 유체기계 연구개발 발표회 논문집,

7공 프로브의 원추각이 유동 측정 정확도에 미치는 영향에 대한 연구

pp. 85~90

- (8) 윤태진, 이상우, 1996, “원추각과 압력공방향이 원추형 5공프로우브의 보정에 미치는 영향,” 대한기계학회 춘계학술대회논문집(B), pp. 359~364